

PROTOCOLO DE ESTUDIO DE MEZCLAS ASFALTICAS DENSAS  
MODIFICADAS CON FIBRAS DE PALMA ESTERA Y GUERREGUE

MARIA CAMILA CASTELLANOS  
JORGE IVAN SUAREZ

UNIVERSIDAD CATOLICA DE COLOMBIA  
FACULTAD DE INGENEIRIA  
PROGRAMA DE INGENIERIA CIVIL  
MODALIDAD TRABAJO DE INVESTIGACION  
BOGOTÁ  
2020

PROTOCOLO DE ESTUDIO DE MEZCLAS ASFALTICAS DENSAS  
MODIFICADAS CON FIBRAS DE PALMA ESTERA Y GUERREGUE

MARIA CAMILA CASTELLANOS  
JORGE IVAN SUAREZ

Trabajo de grado para optar por el título de Ingeniero Civil

Director

PhD. Eduardo Rueda

UNIVERSIDAD CATOLICA DE COLOMBIA  
FACULTAD DE INGENEIRIA  
PROGRAMA DE INGENIERIA CIVIL  
MODALIDAD TRABAJO DE INVESTIGACION  
BOGOTÁ  
2020



## Atribución-NoComercial-CompartirIgual 2.5 Colombia (CC BY-NC-SA 2.5)

La presente obra está bajo una licencia:

**Atribución-NoComercial-CompartirIgual 2.5 Colombia (CC BY-NC-SA 2.5)**

Para leer el texto completo de la licencia, visita:

<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/2.5/co/>

### Usted es libre de:



Compartir - copiar, distribuir, ejecutar y comunicar públicamente la obra  
hacer obras derivadas

### Bajo las condiciones siguientes:



**Atribución** — Debe reconocer los créditos de la obra de la manera especificada por el autor o el licenciante (pero no de una manera que sugiera que tiene su apoyo o que apoyan el uso que hace de su obra).



**No Comercial** — No puede utilizar esta obra para fines comerciales.



**Compartir bajo la Misma Licencia** — Si altera o transforma esta obra, o genera una obra derivada, sólo puede distribuir la obra generada bajo una licencia idéntica a ésta.

Nota de Aceptación

---

---

---

---

---

---

Firma del presidente del jurado

---

Firma del jurado

**BOGOTÁ D.C, noviembre de 2020**

## TABLA DE CONTENIDO

1. INTRODUCCION .....	9
2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....	11
3. ANTECEDENTES Y JUSTIFICACION .....	12
4.1. OBJETIVO GENERAL .....	18
4.2. OBJETIVOS ESPECIFICOS .....	18
4. MARCO DE REFERENCIA .....	19
5.1. MARCO TEORICO .....	19
5.2. MARCO LEGAL .....	24
6. ESTADO DEL ARTE .....	25
7. ALCANCES Y LIMITACIONES .....	27
8. METODOLOGIA Y MATERIALES .....	28
8.1. MATERIALES .....	28
9. RESULTADOS ESPERADOS .....	36
10. CONCLUSIONES .....	38

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Tabla resumen de propiedades estudiadas en distintas fibras naturales.	17
Tabla 2. Tabla de ensayos INV FUENTE: Propia .....	24
Tabla 3. Ensayos INV para agregados pétreos FUENTE: Invias.....	28
Tabla 4. Ensayos INV asfalto 60-70.....	29
Tabla 5. Propiedades mecánicas de las fibras de palma estera y guerregue .....	30
Tabla 6. Propiedades Térmicas de las fibras naturales de guerregue y palma esteras.....	30
Tabla 7. Criterios para el diseño de mezcla asfáltica en caliente por el método Marshall .....	32
Tabla 8. Ensayos a realizar en el protocolo .....	35

## TABLA DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1. Porcentaje de Bagazo vs Estabilidad [10] .....	13
Ilustración 2. Porcentaje de bagazo vs flujo [10].....	14
Ilustración 3. Estabilidad vs Temperatura de una mezcla convencional y una mezcla modificada con fibras de coco [11] .....	14
Ilustración 4. Flujo Vs temperatura de una mezcla convencional y una mezcla modificada con fibras de coco [11].....	15
Ilustración 5. Rigidez vs temperatura de una mezcla convencional y una mezcla modificada con fibras de coco [11].....	15
Ilustración 6. Modulo resiliente de mezclas SMA con adición de fibra de celulosa, fibra de polipropileno y fibra de coco [13] .....	16
Ilustración 7. Palma Estera [24] .....	21
Ilustración 8. Obtención de cogollos de palma estera [24].....	22
Ilustración 9. Palma de guerregue [24] .....	22
Ilustración 10. Obtención de fibras del cogollo de palma de guerregue [24].....	23
Ilustración 11. Curva Granulométrica MDC-19 .....	29
Ilustración 12. Diagrama de esfuerzo y deformación de cinco fibras naturales colombianas.....	30
Ilustración 13. Curvas TG y DTG correspondiente a la fibra de palma Guerregue [8].....	31
Ilustración 14. Curvas TG y DTG correspondiente a la fibra de palma Estera [8]..	31
Ilustración 15. Esfuerzo máximo promedio de tracción en diversas fibras naturales [8].....	37

## TABLA DE ANEXOS

ANEXO 1 .....	42
---------------	----



## 1. INTRODUCCION

Las mezclas asfálticas en caliente son un material que se compone de un esqueleto mineral (agregados), asfalto y vacíos (volumen de aire), el cual es empleado ampliamente en la construcción de estructura de pavimentos. Sin embargo, existe un gran desconocimiento de su comportamiento al tratarse de un material con características viscoelástica (líquido y sólido), las cuales dependen de la temperatura y la velocidad de carga a la cual es sometido ese material. Debido a este desconocimiento, es común ver carpetas de mezcla asfáltica fatigadas o deformadas hasta el punto que dejan de ser útiles.

Hablando específicamente del daño por fatiga en mezclas asfálticas (i.e. mecanismos de deterioro más frecuentes en los pavimentos flexibles asociado al deterioro que se produce en un material a consecuencia de la aplicación de cargas repetidas), en los últimos años se ha intentado mejorar el comportamiento de este material frente a este problema con la incorporación de otros elementos que intentan aumentar la resistencia de las mezclas asfálticas a la tensión provocada por el sometimiento a ensayos de flexión. Dentro de los materiales que se han empleado para reducir el daño por fatiga se encuentran distintos tipos de fibras, las cuales pueden ser sintéticas y/o naturales [1] y han demostrado ser un buen material para mejorar la resistencia a la fatiga que produce la mezcla asfáltica [2]. Dentro de los trabajos desarrollados al respecto, se encuentra que algunos Investigadores han empleado fibras naturales provenientes del coco, bagazo (residuo caña de azúcar) y fibras provenientes de palmas, así como también el uso de fibras sintéticas. Vale la pena reconocer que este trabajo se concentra en el uso de fibras naturales, ya que una de las ventajas que tiene el uso de estas fibras es que no producen contenido de CO<sub>2</sub>, mejorando la tenacidad y resistencia a la fatiga [3].

Con lo dicho anteriormente, las fibras naturales han demostrado ser buenos materiales de refuerzo para mezclas asfálticas, ya que permiten el mejoramiento de la carpeta asfáltica en una estructura de pavimento, convirtiéndolas en una alternativa sostenible ambientalmente, ya que se le está dando un nuevo uso a un material que podía ser considerado desecho, evitando su eliminación en vertederos o en reservas naturales [4]. Adicionalmente, el uso de estos recursos presenta un beneficio económico ya que su costo es mucho menor que una fibra elaborada (sintéticas). [5]

Con el objetivo de seguir avanzando en el uso de fibras naturales como materiales de refuerzo de mezclas asfálticas para la prevención y reducción del daño por fatiga. Esta investigación, busca proponer un protocolo de modificación y evaluación de mezclas asfálticas con fibras provenientes de la palma de estera y guerregue, las

cuales provienen del proceso de extracción para la producción de artesanías, como materiales incorporados en una mezcla asfáltica en caliente.

## 2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El incremento de vehículos en los últimos años en Colombia, según INVIAS (Instituto Nacional de Vías) ha hecho que el estado de la red vial se deteriore notoriamente, en donde las cifras muestran que contamos con 1693.73 km de vía en mal y muy mal estado [6], generando la necesidad de construir vías eficientes, con mayor vida útil y menor grado de deterioro en la capa asfáltica. La mayoría de daños en las vías son debido a cargas repetitivas las cuales causan están asociadas al daño por fatiga en la capa asfáltica, principalmente.

Al respecto y teniendo en cuenta que Colombia es uno de los países con más biodiversidad en flora, con cerca 231 especies de palmas [7] entre las cuales se encuentran las palma de estera y guerregue cuyas fibras naturales se pueden aprovechar como material para mejorar las mezclas asfálticas, contribuyendo a su vez con la disminución de la contaminación al no promover el uso de materiales sintéticos y además ayudar a las comunidades de la cuenca del río Magdalena a disminuir las descargas de desechos.

Se ha cuestionado si: **¿Las fibras naturales de las palmas estera y guerregue pueden contribuir con el aumento de resistencia a fatiga en mezclas asfálticas?**

### 3. ANTECEDENTES Y JUSTIFICACION

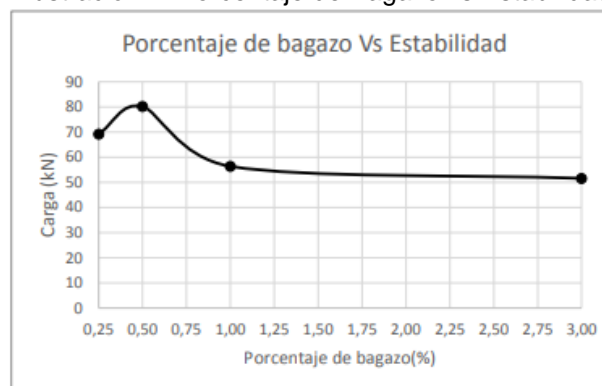
Existen múltiples investigaciones relacionadas a la caracterización de materiales reforzados con fibras naturales para la formación de biocompuestos, donde se analizan sus propiedades físico-químicas para posteriormente definir cuales aportarían más a mejorar el comportamiento mecánico de los materiales a los cuales serán añadidas, prueba de esto es un artículo del año 2017 presentado por Javier Mora Espinosa y Bladimir Ramon Valencia donde se evaluaron cinco fibras naturales provenientes de Colombia como lo son la damagua (*Poulsenia armata*), guérregue, palma estera (*Astrocaryum malybo*), caña flecha (*Gynerium sagitatum*) e iraca (*Carludovica palmata*). Estas fibras fueron evaluadas para determinar sus características morfológicas, su comportamiento mecánico y sus propiedades térmicas. Para evaluar las propiedades térmicas se utilizó una técnica llamada termogravimetría, la cual es una técnica usada para analizar el comportamiento de la masa de una muestra a lo largo del tiempo a medida que se realizan variaciones de temperatura. Como resultado de este ensayo, se dio a conocer que tan estables eran estas mezclas cuando eran sometidas a elevadas temperaturas. En cuanto a la resistencia a la tracción los resultados obtenidos presentaron una alta variación debido a que solo dos de las fibras presentaron comportamientos aceptables frente a la aplicación de cargas axiales, mientras que para la caracterización morfológica se optó por el uso de microscopia electrónica de barrido. Se concluyó a partir de los resultados obtenidos que las fibras de guérregue y las fibras de caña flecha, presentaron mejores comportamientos en los tres parámetros evaluados lo que las hace viables para implementarse en el desarrollo de materiales biocompuestos con matrices poliméricas [8]. Dando continuidad al tema de las fibras como refuerzo en nuevos materiales, según una investigación del año 2013 liderada por Javier Mora Espinosa y Fabuer Ramon Valencia y Bladimir Ramon Valencia se seleccionan, caracterizan y definen las fibras naturales como kenaf, cáñamo y sissal a implementar en el nuevo material producidas en el territorio colombiano empleadas por artesanos locales, grupos étnicos y campesinos, para posteriormente valorar el comportamiento del nuevo compuesto cuando se someten a esfuerzos de tracción y flexión, así como sus propiedades térmicas evaluadas por medio de calorimetría diferencial de barrido y termo-gravimetría, con el análisis de los resultados obtenidos se puede definir cuál es el uso en el cual tendrá un mejor comportamiento este material. [9]

De la misma manera se ha estudiado el efecto que tiene la incorporación de las fibras naturales a mezclas asfálticas en caliente, demostrando una mejora en su comportamiento mecánico como se verá en los estudios mencionados a continuación:

Según una investigación realizada en el año 2017 por Jeisson Fabian Bejarano Lopez y Carlos Fernando Caicedo Garcia se demuestra una mejora en las características y el comportamiento de una mezcla asfáltica MDC-19. El procedimiento llevado a cabo fue la caracterización de cada uno de los materiales a utilizar incluido el bagazo de caña de azúcar, para posteriormente realizar la prueba de estabilidad y flujo a la mezcla de referencia (mezcla convencional, sin adición de bagazo de caña de azúcar), después se repite el mismo procedimiento a mezclas dosificadas con 0.25%, 0.50%, 1.0% y 3.0 % de contenido de bagazo de caña de azúcar, y se realizar ensayos de estabilidad y flujo, desgaste de cántabro mediante máquina de los ángeles y densidad bulk. Analizando los ensayos realizados se determina que la mezcla con un porcentaje de 0.5% de bagazo de caña de azúcar y un contenido de asfalto de 5% presenta un incremento tanto en estabilidad y flujo respecto a otros porcentajes de bagazo, resistiendo una carga de 80.2 KN y un valor de flujo de 187 (1/100”), así como en resistencia a la deformación, además de presentar un menor desgaste en el ensayo de cántabro, con un porcentaje desgaste de 12.8% mientras que la mezcla de referencia es 17.61%, por lo que es viable tanto económica, como ambientalmente el uso de esta mezcla asfáltica modificada, además de comportarse de manera adecuada frente a las pruebas de desempeño y acogiéndose a las especificaciones de la norma, aunque los autores recomiendan realizar más ensayos de laboratorio para determinar características como: análisis y medición de fatiga, deformación permanente, modulo dinámico, entre otros, y con esto finalmente concluir que su uso sea 100% viable. [10]

En la ilustracion 1 se evidencia un incremento en la estabilidad de la mezca desde el 0.25% de adicon de la fibra hasta su punto maximo en 0.5%, depues de esto se evidencia que la estabilidad disminuye considerablemente.

Ilustración 1. Porcentaje de Bagazo vs Estabilidad

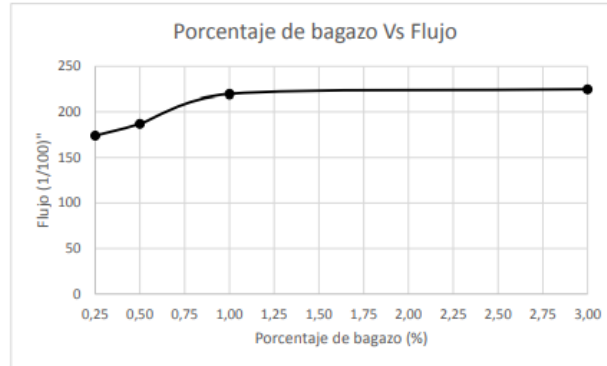


[10]

En la ilustración 2 se muestra que a medida que se añade fibra de bagazo de caña a la mezcla su deformación tiende a aumentar hasta llegar al punto donde se

encuentra el 1% de bagazo, en este punto la deformación tiene un comportamiento constante sin importar la cantidad extra de fibra que se añada.

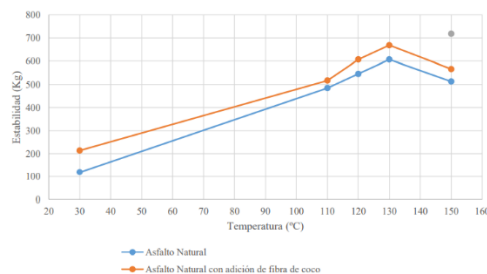
Ilustración 2. Porcentaje de bagazo vs flujo



[10]

Según la investigación presentada por David Gonzalo Tovar Moreno y Alcides José Landínez Saurith en el año 2015, se logra concluir que la adición de fibra de coco en mezclas asfálticas en caliente trae beneficios como el aumento de estabilidad, ya que sin importar la temperatura de mezclado se tiene un aumento de esta propiedad en un 10%, además aumenta la deformación en 28% respecto a una mezcla convencional haciendo que este material tenga una mayor capacidad de deformación y pueda comportarse mejor frente a la imposición de cargas. [11]

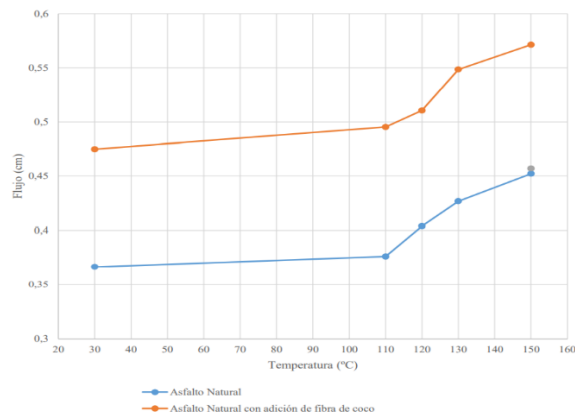
Ilustración 3. Estabilidad vs Temperatura de una mezcla convencional y una mezcla modificada con fibras de coco



[11]

En la ilustración 3 se puede ver que tanto la mezcla asfáltica con asfalto natural como la mezcla modificada con fibra de coco tienen un comportamiento similar, a medida que se incrementa su temperatura de compactación también se incrementa su estabilidad coincidiendo en una temperatura de 130 °C como la óptima de estabilidad a temperatura, aunque es evidenciable que la mezcla modificada con fibras de coco presenta valores mas altos de estabilidad por lo que es un buen indicio en cuanto a la modificación de mezclas asfálticas en caliente se refiere.

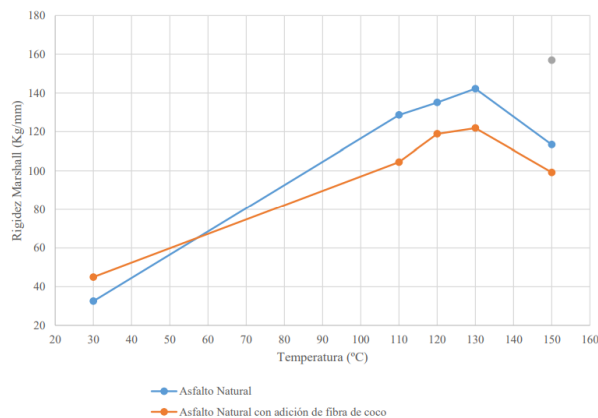
Ilustración 4. Flujo Vs temperatura de una mezcla convencional y una mezcla modificada con fibras de coco



[11]

En la ilustración 4 se evidencian valores mas altos de flujo en la mezcla modificada con fibras de coco, pero siempre manteniendo un comportamiento semejante en cuanto a que a medida que se incrementa la temperatura también lo hace el flujo.

Ilustración 5. Rigidez vs temperatura de una mezcla convencional y una mezcla modificada con fibras de coco



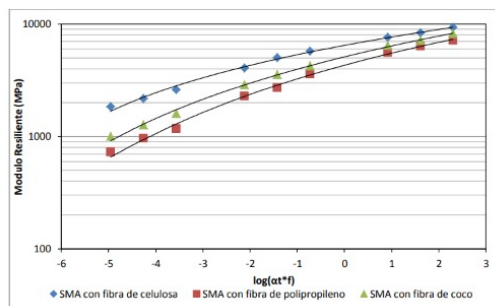
[11]

A pesar que la mezcla modificada con fibras de coco mostraba un mejor comportamiento en parámetros de estabilidad y flujo en comparación a la mezcla sin modificar, la ilustración 5 muestra que la rigidez de la mezcla modificada tiende a disminuir su pendiente en los primeros el primer intervalo de temperatura comprendido entre los 30 y los 110 °C, por lo que pese a presentar un comportamiento parecido, sus valores a temperaturas superiores a los anteriormente mencionados son menores.

Además, las fibras naturales también se han usado como estabilizador en mezclas asfálticas SMA (Stone Mastic Asphalt), también son mezclas asfálticas en caliente, pero de gradación discontinua, han sido de gran uso en Europa para la construcción de carreteras con alto nivel de tráfico, así como pistas de aeropuertos y zonas portuarias, esta tecnología se ha ido implementando en la construcción de carreteras en todo el mundo, en Argentina se ha usado en la construcción de múltiples avenidas como la Avenida Ricchieri, las Avenidas Huergo-Madero, Cantilo, Córdoba, La Plata y J.M. Moreno. En Brasil también se ha implementado su uso, pero su proyecto más notable ha sido la construcción del autódromo José Carlos Pace. La fibra de celulosa es la más usada como agente estabilizador de la mezcla, pero también se pueden usar otras fibras naturales en remplazo de la fibra anteriormente mencionada. [12]

Para el año 2013 según la investigación liderada por Carlos Alberto Preciado Bolívar y Carlos Enrique Sierra Martínez, se realizaron tres mezclas asfálticas con fibra de celulosa peletizada, fibras de polipropileno y fibra de coco, las cuales fueron sometidas diferentes pruebas de desempeño mecánico (Modulo Resiliente, Deformación Plástica y Susceptibilidad a la humedad) demostrando que si bien se alteran las propiedades mecánicas de la mezcla asfáltica, se sigue cumpliendo con las especificaciones requeridas para mezclas de gradación discontinuas en caliente que se muestran en las especificaciones del INVIAS. Además, evidencia ser una gran alternativa en cuanto a la preservación del medio ambiente ya que se da uso de desechos industriales, aunque cabe resaltar que el porcentaje de fibra de coco utilizada se ve alterada debido al uso de un asfalto modificado con polímeros tipos II, para este caso en particular. Asimismo, se reducen costos de importación de la fibra de celulosa, por lo que se concluye que se puede llegar a sustituir la fibra usada normalmente en este caso por fibras de polipropileno y coco, respectivamente. [13]

Ilustración 6. Modulo resiliente de mezclas SMA con adición de fibra de celulosa, fibra de polipropileno y fibra de coco



[13]

Comparado los resultados con el módulo resiliente de una mezcla asfáltica tipo MDC-2, se encuentra que la mezcla tipo SMA con fibra de celulosa tiene un módulo



resiliente mayor en un 64%, la mezcla con fibra de coco un módulo mayor en 21%, y la mezcla con fibra de polipropileno con un módulo aproximadamente igual como se puede evidenciar en la ilustración 6.

Asimismo, en el año 2011 se realizó una investigación a cargo de Sandra Oda, José Leoma Fernandes Jr y Jesner Sereni ildefonso para analizar el comportamiento de diferentes mezclas asfálticas de gradación discontinua utilizando diferentes fibras como: Coco, sisal, celulosa y poliéster. El procedimiento que se llevó a cabo fue realizar diferentes mezclas asfálticas con contenido de fibras tanto naturales como sintéticas para posteriormente realizar ensayos de laboratorio, compararlos y con esto llegar a la conclusión de que las mezclas asfálticas con contenido de fibras naturales (coco y sisal) presentan un mejor comportamiento en la prueba de drenaje frente a las otras fibras (celulosa y poliéster), mientras que mecánicamente todas presentaron buena resistencia a la tracción y alto valor de módulo de resiliencia. Respecto a la fatiga todas tuvieron un comportamiento similar. [14]

Teniendo en cuenta lo anteriormente mencionado se opta por el analisis de las fibras naturales de guerregue y palma estera en mezclas densas asfalticas en caliente, para determinar como se ve afectado el comportamiento a fatiga de la mezcla.

*Tabla 1. Tabla resumen de propiedades estudiadas en distintas fibras naturales*

FIBRAS	CRITERIOS		
	Propiedad estudiada	Ensayos realizados	Referencia
Palma Estera y Guerregue	Comportamiento mecánico (resistencia a tracción)	Aplicación de cargas axiales (Tracción)	[8]
	Estabilidad de las fibras a elevadas temperaturas	Termogravimetría	
	Características Morfológicas	Microscopia electrónica de barrido	
Kenaf, Cábamo y Sisal	Comportamiento mecánico (resistencia a tracción y flexión)	Aplicación de cargas axiales (Tracción)	[9]
	Características térmicas	Calorimetría diferencial de barrido y termogravimetría	
Caña de azúcar	Estabilidad y flujo	Ensayo Marshall (INV E-748)	[10]
	Densidad bulk	Gravedad específica y densidad de las mezclas asfálticas compactadas (INV E-733)	
	Desgaste de cántabro	Máquina de los Ángeles (INV E-760)	
Coco	Estabilidad y flujo	Ensayo Marshall (INV E-748)	[11]
Coco	Módulo resiliente	Tensión indirecta (INV E-725)	[13]
	Deformación plástica	Pista de ensayo de laboratorio (INV E-756)	

## **OBJETIVOS**

### **4.1. OBJETIVO GENERAL**

Proponer protocolo para determinar si de las fibras naturales sugeridas, ayudan a mejorar el desempeño a fatiga de una mezcla asfáltica.

### **4.2. OBJETIVOS ESPECIFICOS**

1. Realizar revisión bibliográfica acerca del uso de fibras naturales como modificador de mezclas asfálticas.
2. Proponer una metodología para la elaboración de las mezclas asfálticas y la evaluación de la vida a fatiga de las mezclas asfálticas.
3. Redactar un protocolo de elaboración y evaluación de mezclas asfálticas con fibras naturales (palma estera y guerregue), como elementos para el mejoramiento a la vida a fatiga de las mezclas asfálticas.

## **4. MARCO DE REFERENCIA**

### **5.1. MARCO TEORICO**

Las mezclas asfálticas en caliente son una combinación de agregados mezclados y recubiertos por cemento asfáltico previamente calentados, se adaptan muy bien al uso que se le vaya a dar dependiendo de la combinación de agregados en la mezcla [15], son susceptibles a las acciones del clima y a repeticiones de carga producidas por el paso de los vehículos las cuales limitan su vida útil, uno de sus deterioros más importantes es el agrietamiento por fatiga. [16]

#### **Agrietamiento por Fatiga**

Este agrietamiento por fatiga usualmente es llamado “piel de cocodrilo” debido a que el patrón formado entre las grietas se asemeja mucho a la piel de cocodrilo, y se produce cuando se excede su resistencia a la fatiga debido a la repetición de las cargas producidas por los ejes de los vehículos, además de un drenaje pobre que permite la saturación de las capas del pavimento y como consecuencia se debilita su estructura. También puede ser producida por más repeticiones de las esperadas de vehículos muy pesados o por una negligencia a la hora de determinar los espesores de cada una de las capas, este agrietamiento puede conducir a que se formen huecos de gran tamaño en las vías. Se tenía pensado que eran producidas desde las capas inferiores de la estructura, pero se ha demostrado que se propagan desde la capa superior hacia abajo, aunque es innegable que una subrasante con un módulo de resiliencia bajo contribuye a este tipo de fallas. [17]

#### **Resistencia a la Fatiga**

Es la resistencia del pavimento al doblamiento repetido debido a la acción de las cargas debajo de las ruedas, el contenido de vacíos y la viscosidad del asfalto tienen un efecto significativo en esta propiedad, en cuanto el porcentaje de volumen de vacíos aumenta, la fatiga del pavimento se acorta drásticamente. Bajos contenidos de asfalto, alto contenido de vacíos y la falta de compactación llevan a que se produzca envejecimiento temprano lo que conduce al agrietamiento por fatiga. [18]

#### **Fibras Naturales**

Las fibras naturales pueden clasificarse en fibras de origen animal (Capullo de seda, plumaje de pollos, tela de arañas y lana) y fibras de origen vegetal las cuales estas

clasificadas como renovables y pueden ser extraídas de la naturaleza sin representar un daño significativo al ambiente, dentro de esta categorización se pueden caracterizar según su origen: provenientes del floema (jute, banana, cáñamo, linaza y mesta), provenientes de las hojas (piña, sisal, agave y pandanus), y provenientes de las semillas o frutas (algodón, palma y coco) [19], las cuales comúnmente se mezclan con polímeros para formar compuestos NFRP (Compuestos poliméricos reforzados con fibras naturales), y han demostrado un comportamiento mecánico similar a las GFRP (Compuestos poliméricos reforzados con fibra de vidrio) por lo que pueden suponer un remplazo a las fibras sintéticas convencionales. [20] El uso de las fibras naturales suponen numerosas ventajas como sus bajas densidades, son fácilmente reciclables, no son abrasivas, presentan altos valores de rigidez, tienen bajo costo energético y económico, pero también representa algunas desventajas, debido a que las temperaturas de procesamiento están limitadas a una temperatura de alrededor 200 grados centígrados, aunque es posible trabajarlos a temperaturas más altas por periodos cortos de tiempo, además, tienen a absorber humedad por lo que pueden llegar a comprometer la estabilidad del compuesto, pero esta absorción puede ser reducida a través de procesos químicos. [21]

Estas fibras pueden extraerse directamente de la naturaleza o haciendo uso de los residuos de diversas industrias llegando a encontrar bagazo de caña, hojuelas de kenaf, cáñamo, tallos de yute, sisal, ramie, palma africana, nueces y cascarilla de arroz, para mencionar algunos ejemplos [22]. Los factores que afectan las propiedades mecánicas de las fibras naturales son numerosas, entre ellas se encuentran, el nivel de madurez de la planta, contenido de celulosa, orientación de las fibras y la especie de la fibra. [8], además la eficiencia de los compuestos reforzados con fibras naturales depende de la capacidad para transmitir los esfuerzos de la matriz a las fibras, esto juega un rol muy importante a la hora de determinar las propiedades mecánicas del mismo. [19]

### **Palma Estera**

Llega a alcanzar los 3 metros de altura y 20 centímetros de diámetro, anillos muy cercanos y grupos de espinas negras de hasta 10 centímetros, en condiciones naturales tiene una vida aproximada de 60 años en los cuales durante su etapa reproductiva puede tener hasta 38 hojas (15 en promedio) con una tasa de producción de 3 hojas cada año. Las fibras de esta palma son extraídas de sus cogollos y hojas más jóvenes y son principalmente usadas para la elaboración de artesanías en el sur del caribe. Los artesanos son los encargados de cosechar las fibras de la palma, aparte de realizar artesanías son pocos los usos que se le da a esta fibra natural. [23]

Ilustración 7. Palma Estera



[24]

### ***Proceso de Obtención de las Fibras de Palma Estera***

Se localizan las palmas adecuadas para realizar la extracción de los cogollos, estas se identifican de manera fácil debido a que son grandes y robustas, cuentan con una gran cantidad de hojas de gran tamaño. Los cogollos apropiados para cosechar se reconocen porque tienen más de 2.5 metros de largo y apenas están comenzando a abrirse en la punta, además sus foliolos son de color amarillo.

La cosecha de esta palma se realiza con ayuda de un garabato para doblar el cogollo lo suficiente para alcanzarlo con la mano, pero siempre con el cuidado de no dañarlo en la base, después, con la mano se sacude fuertemente para separar los foliolos, arrancando los más largos y dejando los más cortos para no detener su crecimiento, y se vuelve a dejar el cogollo en su lugar. Al cosechar estos cogollos se debe tener cuidado al manipular la palma debido a que tiene muchas espinas, por lo que es recomendable usar elementos de protección. Después de obtener los foliolos más largos se organizan en el piso de tal manera que se forme un atado.

[25]

Ilustración 8. Obtención de cogollos de palma estera



[24]

### **Guerregue**

Llega a alcanzar los 12 metros de altura y de 15 a 20 centímetros de diámetro, cubierta casi en su totalidad por espinas negras de hasta 18 centímetros de largo, aunque también las hay sin espinas, están ubicadas en el pacífico desde el norte de chocó hasta el sur de Nariño, sus fibras son utilizadas por los indígenas waunana y emberá para realizar artesanías como hamacas, redes de pesca, bandejas, entre otros, sus fibras son extraídas de los cogollos de las palmas adultas. [23]

Ilustración 9. Palma de guerregue



[24]

### **Proceso de Obtención de las Fibras de Guerregue**

El proceso de obtención de estas fibras presenta dificultades debido a la gran altura de la palma y a que está recubierta casi en su totalidad por fuertes espinas, tradicionalmente se derribaban las palmas para acceder con mayor facilidad y

menos peligro a los cogollos, el cual es retirado con machete para extraer los foliolos descartando los de la base y la punta de la hoja. Debido al impacto ambiental que tiene derribar la palma para obtener los cogollos se opta por tres alternativas para acceder a ellos sin necesidad de tumbar la planta. La primera técnica consiste en cortar el cogollo desde el suelo por medio de una vara de madera comuna cuchilla adosada a la parte superior, lo suficientemente fuerte y larga para alcanzar el cogollo. La segunda técnica consiste en utilizar una escalera de madera apoyada en arboles adyacentes a la palma y así acceder al cogollo de manera más segura que estando en el suelo y la tercera alternativa y la menos viable es usar las ramas de los árboles para llegar a los cogollos de las palmas, pero no siempre se encontraran arboles lo suficientemente cercanos para realizar este procedimiento. [24]

Ilustración 10. Obtención de fibras del cogollo de palma de guerregue



[24]

### **Sostenibilidad**

Debido a que la palma estera es una especie considerada en peligro de extinción su aprovechamiento debe ser planificado y regulado para un uso adecuado de este recurso, y así garantizar que esta especie perdure a lo largo del tiempo, por lo que es de vital importancia conservar sus ecosistemas donde todavía pueden crecer y regenerar su población adecuadamente, además, por medio de un manejo agroforestal que consiste en la siembra de palmas mezclados con otros cultivos se busca obtener plántulas de esta palma para que pueda ser aprovechada sin afectar el medio ambiente.

## 5.2. MARCO LEGAL

*Tabla 2. Tabla de ensayos INV FUENTE: Propia*

ENSAYOS	ESTANDAR COLOMBIANA	US ESTANDAR
CARACTERIZACIÓN		
Leyes de fatiga	INV E- 784	
Ensayo MARSHALL.	INV. E-748	ASTM D1559
Medida de resistencia a tracción indirecta.	INV E-786	ASSHTO T-283
Prueba de abrasión los ángeles.	INV. E-219	ASTM C131
Método de ensayo normalizado para determinar la densidad, la densidad relativa (gravedad específica) y absorción del agregado grueso.	INV E- 222	ASTM C127



## 6. ESTADO DEL ARTE

Para la construcción de pavimentos el material más utilizado es el asfalto de mezcla en caliente [26] A mediados de 1982 en Dinamarca se empezó a utilizar este tipo de mezclas, debido a su bajo contenido de vacíos en el rango de 1.5% a 4.0% repercutiendo positivamente en su vida útil de servicio, Sin embargo, en Francia en el año 1979, redujeron el betún de estas mezclas creando el “Bitumineux Mince”, mejorando así su durabilidad. En el año 2000 en Argentina se añadieron a las mezclas materiales modificadores como fibras, polímeros entre otros dando como resultado mayor resistencia a la fatiga. [12]

La fatiga es uno de los problemas que más se presenta en la estructura de un pavimento, lo cual ocurre cuando los materiales se rompen con el paso repetitivo de las cargas vehiculares, para dar solución a dichos problemas las mezclas asfálticas son sometidas a ensayos Marshall para demostrar cómo pueden mejorarse con diferentes materiales o condiciones [27]. En el 2016 se realizaron estudios que demostraron que, en mezclas densas, el comportamiento negativo por fatiga en el asfalto se debe al envejecimiento por parámetros ambientales como oxígeno y temperatura en la capa superior debido a las cargas, afectando su rendimiento y vida útil [28]. No obstante, es válido mencionar que una subrasante con un módulo de resiliencia bajo también contribuye con la fatiga [17]

Para mejorar la resistencia por fatiga en mezclas asfálticas densas se han implementado varios métodos como fibras en polímeros y la incorporación de fibras que provienen de desechos que fueron utilizadas para también contribuir con los impactos ambientales en el mundo y a su vez mejorar la seguridad y calidad vial [29].

A consecuencia de lo anterior, algunas investigaciones hacen alusión al uso fibras naturales para mejorar el rendimiento de la mezcla. Por ejemplo, en Irán los hallazgos con fibras de lana de cabra y kenaf fueron satisfactorios, ya que con el 0.3% de lana de cabra y 4mm de longitud proporciona resultados con resistencias altas a la fractura [30]. También se han logrado grandes resultados con la incorporación de fibra de carbón a las mezclas asfálticas donde se garantizan distribuciones correctas de estas, teniendo en cuenta parámetros como la longitud y el contenido los cuales afectan directamente el comportamiento mecánico de las muestras, para esto se realizaron ensayos Marshall obteniendo resultados que conducen a la mejora por fatiga con un contenido de 0.025% de carbón y una longitud de 3 cm [31].

Además, se han realizado estudios con fibras naturales provenientes de plantas latinoamericanas las cuales han sido caracterizadas en el año 2017 térmica, morfológica y mecánicamente como lo son las fibras de guerregue y palma estera donde se evidencio que la madurez de la planta y el contenido de celular afecta las

propiedades mecánicas de estas fibras naturales sin embargo se obtuvieron resultados favorables en el módulo de Young. [8]

Finalmente, estudios realizados proporcionan información del comportamiento de las mezclas asfálticas con fibras naturales como aditivos para así aumentar el nivel de confianza en la aplicación de este material en diversos campos [32]. Para esto se llevan a cabo pruebas de resistencia indirecta a la tracción, modulo elástico y dinámico, numero de flujo y resistencia a la fátiga. Por lo general este tipo de fibras mejoras las propiedades mecánicas con contenidos muy bajos y longitudes largas [33]

## **7. ALCANCES Y LIMITACIONES**

La metodología de esta investigación está basada en realizar un protocolo para la elaboración y evaluación de la vida a fatiga de una mezcla asfáltica modificada con fibras de palma estera y guerregue. No obstante, en la investigación se ven varias restricciones como lo son:

- La investigación está enfocada solo a mezclas asfálticas densas.
- La investigación se limita solo a las fibras de palma estera y guerregue.
- Esta investigación es de carácter teórica, ya que infortunadamente por temas de salud pública no fue posible realizar los ensayos, pero esperamos que este protocolo sirva para que en investigaciones futuras sea empleado.

## 8. METODOLOGIA Y MATERIALES

### 8.1. MATERIALES

La mezcla asfáltica que para este protocolo se propone, es una mezcla asfáltica densa en caliente con un esqueleto mineral con tamaño máximo de agregado de 10 mm (MDC 19). Por lo tanto, todos los materiales que vayan a ser empleados para cumplir con el protocolo aquí establecido deben cumplir con las especificaciones propuestas por el INVIAS.

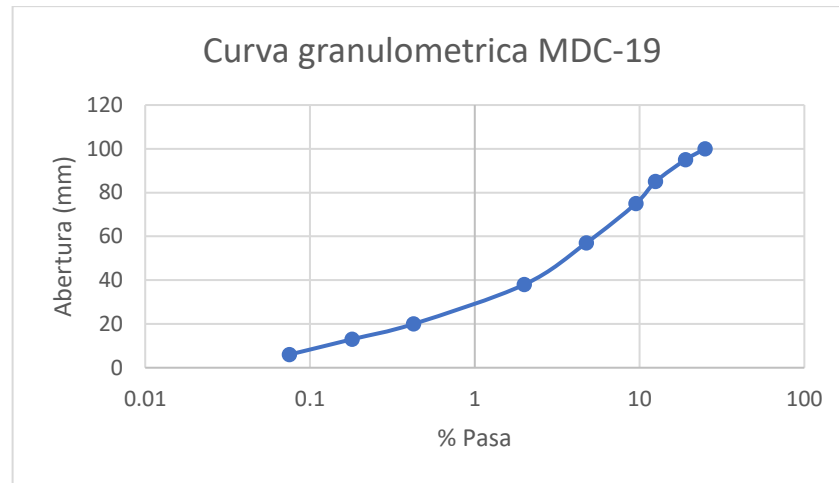
En términos de los agregados (esqueleto mineral), estos materiales deben cumplir con las especificaciones consignadas en la Tabla 3

*Tabla 3. Ensayos INV para agregados pétreos FUENTE: Invias*

AGREGADOS PETREOS				
ENSAYOS	UNIDAD	NORMA INV	ESPECIFICACIONES INVIAS	
			Min	Max
Gravedad específica del llenante mineral		E-128	-	-
Equivalente de arena	%	E-133	50	-
Desgaste los ángeles	%	E-218	-	25
Gravedad específica y absorción de agregado fino		E-222	-	-
Gravedad específica y absorción de agregado grueso		E-223	100	-
Índice de alargamiento y aplanamiento	%	E-230	-	35
Valor de azul de metileno	%	E-235	-	10
Desgaste Micro-Deval	%	E-238	-	20

Teniendo en cuenta que se sugiere como mezcla asfáltica de estudio aquella que cumpla con ser catalogada como MDC 19. Entonces, se sugiere que la mezcla asfáltica cumpla con la granulometría propuesta en la Ilustración 5.

Ilustración 11. Curva Granulométrica MDC-19



FUENTE: Propia

Por otro lado, el INVIAS establece en el artículo 456 que el ligante debe ser un cemento asfáltico modificado, sin embargo, por en esta investigación se basa en la utilización de un ligante convencional clasificado por el sistema de penetración como 60/70 (1/10 mm), el cual cumpla con los ensayos establecidos en las especificaciones INVIAS (Tabla 4).

Tabla 4. Ensayos INV asfalto 60-70

ASFALTO 60-70				
ENSAYOS	UNIDA D	NORMA INV	GRADO DE PENETRACION	
			Min	Max
Penetración	0,1 mm	E-706	60	70
Punto de ablandamiento con aparato de anillo y bola	°C	E-712		
Índice de penetración		E-724		
Viscosidad Absoluta (60°C)	P	E-716		
Ductilidad	cm	E-702	100	
Punto de ignición mediante la copa de Cleveland	°C	E-709	230	

## FIBRAS

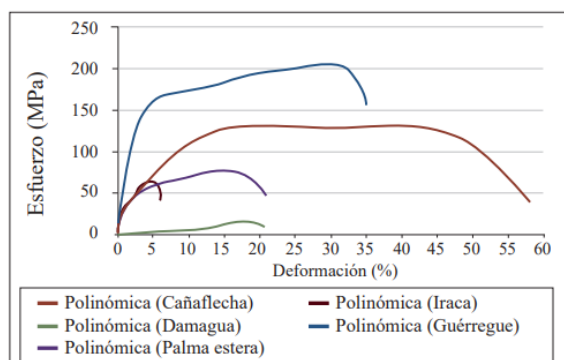
Las fibras que fueron seleccionadas para mejorar las mezclas asfálticas en caliente, en términos de resistencia a fatiga, fueron fibras naturales las cuales provienen como desecho del uso de las palmas guerregue y estera en la fabricación de artesanías. Las propiedades de estas fibras son expuestas a continuación.

Tabla 5. Propiedades mecánicas de las fibras de palma estera y guerregue

PROPIEDADES MECANICAS		
Material	Fibra Estera	Fibra Guerregue
Absorción de agua	Despreciable	Despreciable
Longitud de fibra (mm)	20-64	20-64
Módulo elástico (Gpa)	2.53	5.85
Esfuerzo máximo a tensión (Mpa)	104.73	249.11
Deformación (%)	31.07	36.29

[8]

Ilustración 12. Diagrama de esfuerzo y deformación de cinco fibras naturales colombianas



[8]

Para las fibras de guerregue y palma estera se observa que tienen un comportamiento dúctil ya que tiene al inicio una zona elástica y posteriormente una zona plástica, los valores de esfuerzo máximo a tensión se encuentran consignados en la tabla 5 siendo la fibra de guerregue la que presenta un valor mayor de este esfuerzo siendo este 249.11 Mpa.

Tabla 6. Propiedades Térmicas de las fibras naturales de guerregue y palma estera

PROPIEDADES TERMICAS		
	Temperatura (C°)	Pérdida de masa (%)
FIBRA DE GUERREGUE	15 a 125	7.58
	287	16.39
	347	47.4
FIBRA PALMA ESTERA	15 a 125	6.31
	284	24.08
	321	32.71

[8]

Ilustración 13. Curvas TG y DTG correspondiente a la fibra de palma Guerregue

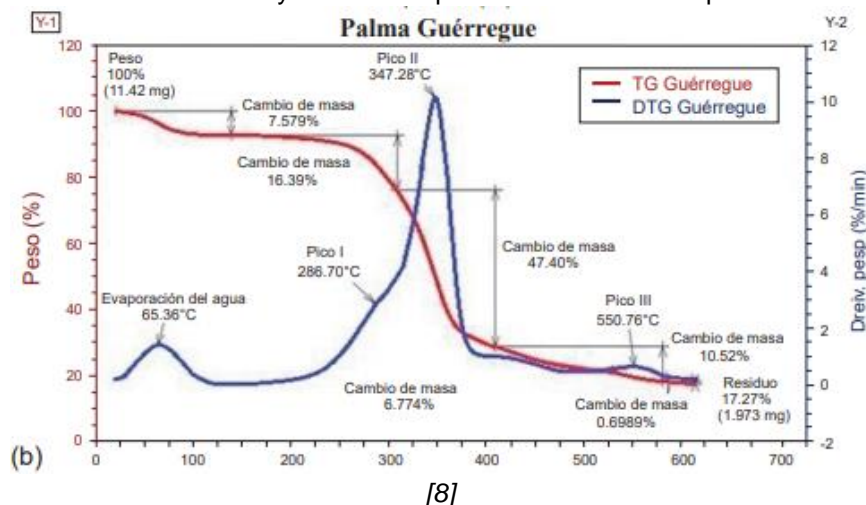
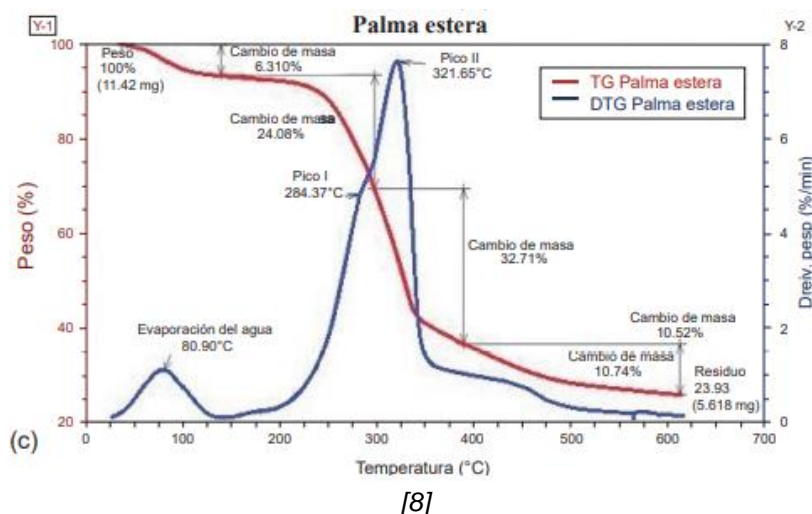


Ilustración 14. Curvas TG y DTG correspondiente a la fibra de palma Estera



Comparando las graficas mostradas en las ilustraciones 13 y 14 en las curvas TG de las fibras naturales de palma estera y guerregue se evidencia que la fibra de la palma estera a una temperatura de 125°C tiene una perdida de masa menor a la fibra de guerregue, siendo 6.31% y 7.58% sus valores correspondientemente, pero a una temperatura de entre 284 y 284°C la palma estera sufre una perdida de masa considerable respecto a la fibra de guerregue, pero a temperaturas superiores a 320°C la palma estera vuelve a presentar una menor perdida de masa como se puede evidenciar en la Tabla 6.

Para la elaboración de las probetas se seguirá lo establecido para la metodología Marshall en la norma INV E-748, numeral 5, donde se muestra el proceso de elaboración de las muestras.

## 8.2. ELABORACION DE LAS PROBETAS

### **Determinar Temperatura de Mezclado y Compactación Según Norma Inv E-753**

La temperatura a la cual se debe calentar el cemento asfáltico convencional para la elaboración de la mezcla 60/70 será la requerida para que la viscosidad sea de 0.17 +- 0.02 Pa.s. Para la compactación se debe tener en cuenta una viscosidad en el cemento asfáltico de 0.28 +- 0.03 Pa.s. con este proceso es necesario dejar reposar la mezcla un tiempo determinado hasta tener una temperatura de 10°C por debajo de la temperatura de Mezclado, seguido de esto se engrasa el molde para iniciar la compactación

### **Diseño de la Mezcla Asfáltica**

Preparar una serie de probetas con diferentes contenidos de asfalto para determinar el óptimo, los porcentajes a usar serán desde 4% con aumentos del 0.5% hasta llegar a 6%, a cada uno de estos porcentajes se deberá realizar la prueba de estabilidad y flujo, además de hacer el diseño de la mezcla con las especificaciones mostradas a continuación:

*Tabla 7. Criterios para el diseño de mezcla asfáltica en caliente por el método Marshall*

CARACTERISTICA		Mezclas densas, semidensas y gruesas		
		Categoría del tránsito		
		NT1	NT2	NT3
Compactación (Golpes/Cara)		50	75	75
Estabilidad Mínima (N)		5000	7500	9000
Flujo (mm)		2 a 4	2 a 4	2 a 3.5
Relación Estabilidad/Flujo		2 a 4	3 a 5	3 a 6
Vacíos con aire (%)	Rodadura	3 a 5	3 a 5	4 a 6
	Intermedia	4 a 8	4 a 7	4 a 7
	Base	NA	5 a 8	5 a 8
Vacíos en los agregados minerales (%) mínimo	T. Max 38 mm	13		
	T. Max 25 mm	14		
	T. Max 19 mm	15		
	T. Max 10 mm	16		
Vacíos llenos de asfalto (%)		65 a 80	65 a 78	65 a 75



Para el diseño de esta mezcla se opta por un nivel de tránsito 2 (NT2) y una capa de pavimento intermedia, por lo que siguiendo este orden de ideas se deberá compactar a 75 golpes por cara, además de cumplir con las especificaciones mínimas correspondientes para los valores mínimos de estabilidad y de flujo.

### **Elaboración de las Mezclas**

Para cada contenido de asfalto se elaboran las probetas con 1200g de mezcla asfáltica para cada una. El agregado se calienta en una placa de calentamiento o en un horno a la misma temperatura de calentado del asfalto, la cual se obtiene del ensayo de viscosidad. Una vez seco se añaden las respectivas fibras de palma estera y guerregue con una dosificación desde 0.5% con incrementos de 0.5% hasta llegar a 2%. Posteriormente, se forma un cráter en el centro donde se añade el asfalto correspondiente y se mezcla lo más rápido posible hasta tener una mezcla homogénea para elaborar la probeta.

Si se realiza el procedimiento de las bachadas sencillas (para una sola probeta), se debe colocar en un horno ventilado dentro de un recipiente metálico cerrado a una temperatura de 8 a 11°C por encima de la establecida para la compactación por un periodo de entre 1 a 2 horas. En caso de bachadas múltiples (para varias probetas), se colocan sobre una superficie limpia y no absorbente, se mezcla manualmente y se cuartea para producir las porciones correspondientes para elaborar cada una de las probetas, colocando cada una en un recipiente para después seguir el procedimiento de las bachadas sencillas.

Simultáneamente a la preparación de la mezcla, el molde, collar, placa de base y base del martillo de compactación se limpian y calientan en un baño de agua hirviendo o en un horno a una temperatura de entre 90 y 150°C. Se arman los moldes de las mezclas colocando en el fondo un papel de filtro circular de tamaño ajustado al área interna del molde. Posteriormente se coloca toda la porción de la mezcla en el molde y se golpea 15 veces alrededor del perímetro y 10 sobre el interior con una espátula o palustre caliente y se coloca otro papel filtro sobre la mezcla.

Se coloca el molde en el sujetador sobre el pedestal de compactación y se aplica el número de golpes especificado (75 golpes por cara) empleando el martillo de compactación. Se retiran la placa de base y el collar y se colocan en los extremos opuestos del molde; se vuelve a montar en el pedestal y se aplica el mismo número de golpes a la cara invertida de la muestra (75). Después de este proceso de compactación se retiran el collar y la placa de la base para dejar enfriar la muestra hasta que la temperatura sea tal que no se produzca ningún daño en ella al extraerla. Si se quiere acelerar este proceso se puede optar por el uso de ventiladores en la mesa o sumergir el molde en agua fría dentro de una bolsa

plástica bien sellada. Se extrae la muestra con ayuda del extractor, se identifica con la crayola y se coloca sobre una superficie uniforme descansando por una noche.

En dado caso que la compactación se haga de manera manual, el operador debe sostener el martillo de manera completamente vertical de tal manera que no haya ningún tipo de rozamiento entre este y la guía del martillo.

Una vez cumplido el periodo de reposo se procede a determinar la gravedad específica bulk de cada probeta mediante los procedimientos descritos en las normas INV E-733 O INV E – 734.

### **8.3. EVALUACIÓN DE LA VIDA A FATIGA DE LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS**

#### **Determinación de la Resistencia a la Tensión Indirecta (RTI) de las Mezclas Asfálticas INV E-786**

La resistencia a tensión se determina cuando se carga un espécimen en este caso cilindro de mezcla asfáltica bajo unas condiciones específicas de velocidad, deformación y temperatura. Con el valor de la carga máxima se calcula la RTI del espécimen.

Se determina la altura del espécimen con aproximación a 1 mm según la norma INV E- 744, se lleva a una temperatura de ensayo de 1.0°C por el procedimiento C el cual indica que se introduce el espécimen en un baño de agua durante 30 a 120 minutos, pasado este tiempo se coloca el espécimen sobre la banda de carga inferior del equipo se verifica que las bandas de carga se encuentren paralelas y centradas este procedimiento no debe exceder más de 2 minutos.

Aplicando la carga vertical de compresión sobre la probeta se anota el valor de la carga máxima y la velocidad de deformación deberá ser de 50 +- 5 mm/min.

Por otro lado, también se recomienda hacer el ensayo de leyes de fatiga de mezclas asfálticas compactadas en caliente sometidas a flexión dinámica (INV E-784) el cual no se encuentra en los laboratorios de la Universidad Católica de Colombia, pero es importante ya que este indica con mayor precisión su comportamiento en servicio frente a la acción de las cargas repetitivas del tránsito.

#### **Determinación de las Leyes de Fatiga de Mezclas Asfálticas Compactadas en Caliente Sometidas a Flexión Dinámica (INV. E 784)**

Las briquetas deben tener una longitud de 380 mm, un ancho de 63mm y una altura de 50mm, para eliminar áreas con vacíos superficiales se deben cortar 6mm en ambas caras, estas superficies deben ser suaves y paralelas para permitir un

montaje correcto de los deformímetros. las dimensiones finales después de cortados son: 6mm de longitud, 6mm de base y 6mm de altura.

La altura y el ancho del espécimen se toman en 3 puntos diferentes a lo largo de los 100mm centrales de la muestra luego se determina el promedio de las tres y se aproxima a 0.1mm. Localizando el centro de una de las caras laterales del espécimen se aplica un epóxido alrededor del punto central y se pega la tuerca.

El espécimen se somete a una temperatura de 0.5°C, durante un periodo de dos horas. Luego de pasar este tiempo las mordazas del equipo se abren y se desliza el espécimen hasta que alcance la posición de ensayo, cada mordaza debe tener una distancia entre ellas de 119 mm cuando todo esté en posición se cierran las mordazas aplicando una tensión para así permitir que el espécimen quede en el lugar correcto.

Para las condiciones iniciales deseadas del ensayo en cuanto a deformación se escoge entre 250 a 750 micro deformaciones y frecuencia de carga la cual se fija entre un rango de 5 a 10 Hz. En este ensayo se aplican 50 ciclos de carga con una deformación constante, se determina la rigidez en cada número 50 del ciclo, el espécimen debe experimentar como mínimo 10000 ciclos de carga antes de que su rigidez se reduzca a 50% o menos de la rigidez inicial para así si esto pasara el espécimen fallaría.

Este ensayo se por concluido cuando los especímenes experimenten una reducción de más del 50% de su rigidez.

*Tabla 8. Ensayos a realizar en el protocolo*

<b>ENSAYOS</b>	<b>NOR MA</b>
Ensayo Marshall	INV-748
Determinación de temperatura de mezclado y compactación	INV-753
Determinación de la resistencia a la tensión Indirecta (RTI) de las Mezclas Asfálticas	INV-786
Determinación de las leyes de fatiga de mezclas asfálticas compactadas en caliente sometidas a flexión dinámica	INV-784

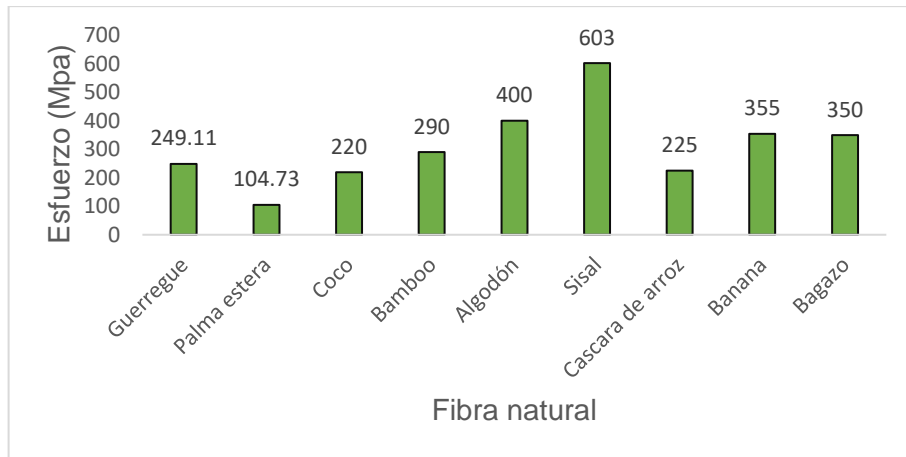
FUENTE: Propia

## 9. RESULTADOS ESPERADOS

Como resultado de este trabajo se presenta el protocolo de elaboración y evaluación de la vida a fatiga para una mezcla asfáltica MDC 19 (Anexo A). Pero teniendo en cuenta que los procedimientos experimentales no fueron realizados debido a la actual situación por la cual está pasando el mundo entero, decidimos realizar un análisis de los resultados que esperamos basados en las investigaciones analizadas en este trabajo.

Comparando los valores de esfuerzo a tracción de diferentes fibras naturales ya usadas para la modificación de mezclas asfálticas se evidencia que la fibra de guerregue se encuentra en un rango cercano a fibras como el coco, bambú, cascara de arroz y bagazo por lo que se espera que en las pruebas de estabilidad y flujo tenga un comportamiento similar a las fibras anteriormente mencionadas en contenidos de asfalto de entre 5% y 6 %, mientras que la palma estera se encuentra en un rango inferior a los demás, debido a esto se debe adicionar más porcentaje de esta fibra a la mezcla para lograr un comportamiento similar pero evaluando que se cumpla con las especificaciones de la mezcla y cumpla con todos los parámetros de volumetría, además en cuanto a la fatiga, comparándolo con estudios realizados a mezclas asfálticas modificadas con bambú se sabe que la resistencia a tensión de la fibra decrece en cuanto se aumenta la temperatura, para el caso de la fibra de guerregue a temperaturas cercanas a los 125 °C se ve una pérdida de masa del 7.58% pero en el rango entre 125°C y 287°C presenta un comportamiento asintótico por lo que en los valores iniciales de ese rango su pérdida de masa no será significativa, y teniendo en cuenta que la temperatura de mezcla no será superior a los 200°C la degradación no será considerable pero su resistencia a la tensión disminuirá aunque se espera que aun así presente un mejor comportamiento que una mezcla sin modificar. Para el caso de la fibra de palma estera en los mismos rangos de temperaturas iniciales sufre de una pérdida de masa de 6.31% y en rangos de entre 125°C Y 284°C tiene un comportamiento similar a la fibra de guerregue por lo que para temperaturas inferiores a los 200°C su pérdida de masa no será tan relevante. Teniendo en cuenta el mismo estudio realizado al bambú se espera que las fibras también reduzcan el ahuellamiento y el agrietamiento para los porcentajes de adición de fibra propuestos.

*Ilustración 15. Esfuerzo máximo promedio de tracción en diversas fibras naturales*



[8]

En otro caso se estudió se evidencia que el comportamiento a fatiga de mezclas modificadas con celulosa, coco y sisal es bastante similar entre sí y comparando con los valores de esfuerzo a tensión que se muestran en la ilustración 15 se espera que las mezclas modificadas con las fibras propuestas tengan un comportamiento similar esperando que resistan un numero de ciclos que oscile entre los 700 y los 1000, rango de ciclos en el cual se comportan las fibras de sisal y coco.

## 10. CONCLUSIONES

En esta investigación se propone un protocolo para la modificación de mezclas asfálticas en caliente por medio de un análisis físico-mecánico y la posterior incorporación de dos fibras naturales colombianas (Palma estera y Guerregue) las cuales contribuirán con un incremento de la resistencia a fatiga. Definiendo parámetros para la mezcla como tipo de asfalto 60-70, características de los agregados especificadas por el INVIAS para una mezcla MDC-19.

Por medio de la metodología Marshall se define el porcentaje óptimo de asfalto para la mezcla asfáltica empleada en esta investigación. Una vez diseñada la mezcla, esta es modificada en diferentes proporciones con las fibras naturales, los cuales están entre 0, 0.5, 1, 1.5 y 2%. Una vez elaboradas las probetas se procede a realizar el ensayo de tracción indirecta y así evaluar el comportamiento a fatiga de la mezcla.

Además, la modificación de las mezclas asfálticas en caliente con los desechos de las fibras naturales de palma estera y guerregue genera un impacto ambiental positivo ya que se reutilizan los desechos del proceso de fabricación de artesanías obteniendo una posible mejora a la resistencia de fatiga lo cual podría contribuir a la reducción de costos de mantenimiento y reparación de las vías.

Se recomienda realizar el ensayo de fatiga INV E-784 (Determinación de las leyes de fatiga de mezclas asfálticas compactadas en caliente sometidas a flexión dinámica) en caso de ser posible, ensayo por medio del cual se define la rigidez de la mezcla con el fin de predecir con mayor exactitud su comportamiento en servicio frente a la acción de las cargas repetitivas del tránsito.

Como segunda recomendación se sugiere realizar ensayos de resistencia para determinar si esta propiedad se ve afectada frente a la modificación de la mezcla asfáltica en caliente con las fibras naturales.

## 11.BIBLIOGRAFÍA

- [1] M. Aliha and A. M. Razmi, "The influence of natural and synthetic fibers on low temperature mixed mode I+ II fracture behavior of warm mix asphalt (WMA) materials," 2017.
- [2] L. a. Zuzhong , Z. Xuelei , Z. a. Yayun and J. Xiong b, "Research on characteristics and properties of bagasse fibers: Behavior of asphalt mixtures with bagasse fibers".
- [3] H. Weerasinghe, "Fundamental study on the use of coir fibre boards as a roofing material," 1997.
- [4] B. J. Putman and S. N. Airkhanian, "Utilization of waste fibers in stone matrix asphalt mixtures," 2014.
- [5] H. B. Pedersen, "Mocora palm fibers: use and management of *astrocaryum standleyanum* ( arecaceae) in Ecuador".
- [6] INVIAS, 30 Junio 2020. [Online]. Available: <https://www.invias.gov.co/index.php/informacion-institucional/2-principal/57-estado-de-la-red-vial>.
- [7] Ministerio de ambiente, "Fauna y flora Colombiana," 2000.
- [8] W. J. Mora Espinosa and B. A. Ramon Valencia, "Caracterización térmica, mecánica y morfológica de fibras naturales colombianas con potencial como refuerzo de biocompuestos," 2017.
- [9] W. J. Mora Espinosa, B. A. Ramón Valencia and F. Ramon Valencia, "DESARROLLO DE MATERIALES BIOCOMPUESTOS REFORZADOS CON FIBRAS NATURALES COLOMBIANAS," *REVISTA AMBIENTAL AGUA,AIRE Y SUELO*, 2013.
- [10] J. F. Bejarano Lopez and C. F. Caicedo Garcia, "ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO FISICO- MECANICO DE LA MEZCLA ASFÁLTICA TIPO MDC-19 CON FIBRA NATURAL DE CAÑA DE AZUCAR," 2017.
- [11] D. G. Tovar Moreno and A. J. Landinez Saurith, "MEZCLAS DENSAS EN CALIENTE A PARTIR DE ASFALTO NATURAL CON ADICION DE FIBRA DE COCO," 2015.

- [12] E. M. P. Fracaro, "Concreto asfáltico mejorado: SMA- Stone mastic asphalt," 2019.
- [13] C. A. Preciado Bolivar and C. E. Sierra Martinez, "UTILIZACIÓN DE FIBRAS DESECHAS DE PROCESOS INDUSTRIALES COMO ESTABILIZADOR DE MEZCLAS ASFALTICAS SMA," 2013.
- [14] S. Oda, J. L. Fernandes Jr and J. Sereni ildefonso, "Analysis of use of natural fibers and asphalt rubber binder in discontinuous asphalt mixtures," 2011.
- [15] A. Montejo Fonseca, " INGENIERÍA DE PAVIMENTOS PARA CARRETERAS," 2002.
- [16] P. Garnica Anguas, M. Flores Flores, J. A. Gómez López and H. Delgado Alamilla, "Caracterización Geomecánica de Mezclas Asfálticas," 2005.
- [17] E. Brown Ray, P. S. Kandhal and J. Zhang, "PERFORMANCE TESTING FOR HOT MIX ASPHALT," 2001.
- [18] A. Institute, Principles of construction of quality hot-mix asphalt pavements, Washington, D.C, 1982.
- [19] O. Abiola, W. Kupolati, E. Sadiku and J. Ndambuki, "Utilisation of natural fibre as modifier in bituminous mixes: A review," *Construction and Building Materials*, 2014.
- [20] L. Kin-Tak, H. Pui-yan, Z. Min-Hao and D. Hui, "Properties of natural fibre composites for structural engineering applications," 2017.
- [21] R. Rowell, A. Sanadi, D. F. Caulfield and R. Jacobson, "Utilization of Natural Fibers in Plastic Composites: Problems and Opportunities".
- [22] C. Tapia, C. Paredes, A. Simbaña and J. Bermudez, "Aplicación de las Fibras Naturales en el Desarrollo de Materiales Compuestos y como Biomasa," *Revista Tecnológica ESPOL*, 2006.
- [23] N. Garcia, "Cosechar sin destruir - Aprovechamiento sostenible de palmas colombianas," Bernal R y G Galeano, 2013.
- [24] E. Linares , G. Galeano , N. Garcia and Y. Figueroa, "Fibras vegetales utilizadas en artesanías en Colombia," 2008.
- [25] N. Garcia, R. Bernal, G. Galeano and O. Pedrozo, "Cartilla para el manejo y aprovechamiento de la palma estera (*Astrocaryum malymbo*)," 2013.



- [26] G. Valdes Vidal, A. Calabi Floody, E. Alonso Sanchez , C. Diaz and C. Fonseca, "Highway trial sections: Performance evaluation of warm mix asphalt and recycled warm mix asphalt".
- [27] L. Momm , B. Barra, Y. Guerrero and L. Bernucci , "Fatigue behavior of dense asphalt mixes in dry and enviromental-conditionigs states".
- [28] "The effect of different aging conditions and strain levels on relationship between fatigue life of asphalt binders and mixtures.".
- [29] G. Valdes Vidal, A. Calabi Floody , E. Sanchez Alonso and R. Miró b, "Effect of aggregate type on the fatigue durability of asphalt mixtures".
- [30] S. Pirmohammad, Y. Shokorlou Majd and B. Arnani, "Influence of natural fibers (kenaf and goat wool) on mixed mode I/II fracture strength of asphalt mixtures".
- [31] F. Moghadas Nejada, M. Vadoodb and S. Baeetabara, "the mechanical properties of carbon fibre-reinforced asphalt concrete," 2014.
- [32] N. Kiran Kumar and A. Ravitheja, "Characteristics of stone matrix asphalt by using natural fibers as additives".
- [33] L. Ferreira da Costa, L. Christiane de figueiredo Lopes, A. E. Figueiredo Lopes Lucena and A. Grangeiro de Barros, "Use of Banana Fibers in SMA Mixtures".
- [34] K. Klinsky a, V. Kaloush b, V. Faria a and B. c. V.S.S, "Performance characteristics of fiber modified hot mix asphalt".
- [35] K. Mohammad Ali and A. Saeed Kriem, "Analytic methods to evaluate bituminous mixtures enhanced with coir/coconut fiber for highway materials".
- [36] T. Väisänen, A. Haapala, R. Lappalainen and L. Tomppo, "Utilization of agricultural and forest industry waste and residues in natural fiber-polymer composites: A review," 2016.

## ANEXO 1

### **PROTOCOLO DE ESTUDIO DE MEZCLAS ASFALTICAS DENSAS MODIFICADAS CON FIBRAS DE PALMA ESTERA Y GUERREGUE**

#### **1. OBJETO**

En este protocolo se describe el procedimiento para determinar la resistencia a fatiga de mezclas asfálticas en caliente modificadas con fibras naturales de palma estera y guerregue

#### **2. RESUMEN DEL METODO**

#### **3. EQUIPO**

##### **3.1 Metodología Marshall INV E-748**

###### **3.1.1 Dispositivo para moldear probetas**

###### **3.1.2 Extractor de probetas**

**3.1.3 Martillo de compactación de mango fijo:** El martillo tiene una masa total de  $4.54 \pm 0.01$  Kg y una altura de caída libre de  $457.2 \pm 1.5$  mm, la rotación de la base debe ser de 18 a 30 rpm y su frecuencia de golpeo del martillo debe ser de  $64 \pm 4$  golpes/minuto.

###### **3.1.4 Mordazas**

**3.1.5 Máquina de compresión:** Capaz de producir una velocidad de desplazamiento vertical de  $50 \pm 5$  mm/min.

**3.1.6 Medidor de estabilidad:** Medida con un anillo dinamométrico acoplado a la prensa de 20 KN de capacidad nominal con una sensibilidad de 50 N. Las deformaciones del anillo serán medidas con un dial graduado en 0.0025 mm.

###### **3.1.7 Medidor de deformación**

###### **3.1.8 Equipo misceláneo**

##### **3.2 Ensayo de tracción indirecta INV E-786**

3.2.1 Dispositivo de carga

3.2.2 Bandas de carga

3.3 Ensayo Determinación de las leyes de fatiga de mezclas asfálticas compactadas en caliente sometidas a flexión dinámica INV E-784

3.3.1 Sistema de ensayo

3.3.2 Dispositivo de aplicación de carga de cadena cerrada

#### 4. PREPARACION DE ESPECIMENES DE ENSAYO

##### 4.1 Metodología Marshall INV E-748

4.1.1 Para cada contenido de asfalto se realizarán cinco probetas, para un total de 25. Contenidos de asfalto desde 4% con variaciones de 0.5% hasta llegar al 6%.

4.1.2 La temperatura a la cual se debe calentar el cemento asfáltico convencional será la requerida para que la velocidad sea de 0.17 p.a. s

4.1.3 Para cada contenido de asfalto se elaboran las probetas con aproximadamente 1200g de mezcla asfáltica para cada una, el agregado se calienta en una placa de calentamiento o en un horno a una temperatura que no exceda los 28°C; una vez seco se añaden las respectivas fibras de palma estera y guerregue con una dosificación desde 0.5% con incrementos de 0.5% hasta llegar a 2%. Posteriormente, se añade el asfalto correspondiente y se mezcla lo más rápido posible hasta tener una mezcla homogénea para elaborar la probeta.

4.1.4 Se coloca toda la porción de la mezcla en el molde y se golpea 15 veces alrededor del perímetro y 10 sobre el interior con una espátula o palustre caliente.

4.1.5 Se coloca el molde en el sujetador sobre el pedestal de compactación y se aplica el número de golpes especificado (75 golpes por cara) empleando el martillo de compactación. Se retiran la placa de base y el collar y se colocan en los extremos opuestos

del molde; se vuelve a montar en el pedestal y se aplica el mismo número de golpes a la cara invertida de la muestra (75).

#### 4.2 Ensayo de tracción indirecta INV E-786

4.2.1 Los especímenes del laboratorio deben tener un diámetro nominal de 101.6 mm, su altura debe ser 50.8 mm.

#### 4.3 Ensayo Determinación de las leyes de fatiga de mezclas asfálticas compactadas en caliente sometidas a flexión dinámica INV E-784

4.3.1 Se fabrican especímenes en forma de viga las cuales deben tener una longitud de 380 mm un ancho de 63 mm y una altura de 50 mm

### 5. PROCEDIMIENTO DEL ENSAYO

#### 5.1 Metodología Marshall INV E-748

##### 5.1.1 Ensayo de estabilidad y flujo

Después de elaborarse las probetas como ya se mencionó en el numeral 4.1 se procede a realizar el ensayo de estabilidad y flujo para los contenidos de asfalto propuestos, este ensayo debe realizarse dentro de las 24 horas siguientes a la compactación de las probetas. Se colocan las probetas en un baño de agua durante 30 a 40 minutos o en el horno a 60°C durante 120 a 130 minutos. Se retira la probeta del horno (o del baño de agua) y se coloca el medidor de flujo en posición, se ajusta a cero y se mantiene su vástago contra la mordaza superior mientras se aplica la carga de ensayo. Posteriormente se aplica la carga sobre la probeta con la prensa a una rata de deformación constante de  $50 \pm 5$  mm/min hasta que ocurra la falla, es decir cuando se alcanza la carga y luego comience a decrecer. Todo este proceso desde la remoción de la probeta del horno hasta su falla no deberá demorar más de 30 segundos.

Empleando el método A (tradicional) en el que se hace uso de un marco de carga con un anillo de carga y un dial para medir la deformación de las probetas, el flujo será la deformación registrada por el dial en el instante de la falla.

## 5.2 Ensayo de tracción indirecta INV E-786

Una vez determinado el contenido óptimo de asfalto con la adición de las fibras de palma estera y guerregue se procede a realizar la fabricación de los especímenes con las especificaciones mencionadas en el numeral 4.2 para realizar el ensayo de tracción indirecta tal.

5.2.1 Se introduce el espécimen en un baño de agua en un tiempo comprendido entre 30 a 120 minutos.

5.2.2 Se aplica una carga vertical de compresión sobre la probeta a una velocidad de deformación de  $50 \pm 5\text{mm/min}$

## 5.3 Ensayo Determinación de las leyes de fatiga de mezclas asfálticas compactadas en caliente sometidas a flexión dinámica INV E-784

Se repite el mismo procedimiento para realizar el ensayo de determinación de las leyes de fatiga, una vez determinado el porcentaje óptimo de asfalto según la metodología marshal se procede a elaborar los especímenes para este ensayo de laboratorio tal y como se especifica en el numeral 4.3.

5.3.1 Se localiza el centro de una cara lateral del espécimen para la colocación de las mordazas

5.3.2 El espaciamiento apropiado entre mordazas debe ser de 119 mm, medida de centro a centro.

5.3.3 Para las condiciones iniciales deseadas del ensayo en cuanto a deformación se escoge entre 250 a 750 micro deformaciones y frecuencia de carga la cual se fija entre un rango de 5 a 10 Hz.